

ՀՏԴ 371.31:53

Ֆիզիկա

ՋԵՐՄԱՇԱՐԺԻՉՆԵՐԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ

ՄԿԶԲՈՒՆՔՆԵՐԸ ԵՎ ՆՐԱՆՑ ՕԳԳ-Ն

Կարեն ԱՐԱՄՅԱՆ

Բանալի բառեր՝ Թերմոդինամիկա, ջերմաշարժիչներ, Կառնոյի ցիկլ, ջեռուցիչ, սառնարան, աշխատանք, ջերմաքանակ, հավասարակշիռ պրոցես, դարձելի պրոցես, օգտակար գործողության գործակից:

Ключевые слова: Термодинамика, тепловые двигатели, цикл Карно, нагреватель, холодильник, работа, количество теплоты, равновесный процесс, обратимые процессы, коэффициент полезного действия

Keywords: Thermodynamics, heat engines, Carnot cycle, heater, refrigerator, work, quantity of heat, reversible process, the efficiency of the action

К. Арамян

Физические принципы работы тепловых двигателей и их КПД

В работе обсуждается одна из традиционных тем как школьного, так и вузовского курсов физики- физические принципы работы тепловых двигателей и те фундаментальные физические законы, на которых основана работа тепловых двигателей. Особенно подчеркивается, что равновесность, и, соответственно, обратимость процессов являются краеугольным камнем доказательства теоремы Карно.

Указывается, что известный вид цикла однозначно следует из требования обратимости всех процессов, так же как и из требования получения максимального КПД.

По аналогии с формулой элементарной работы предлагается пользоваться также формулой элементарного количества теплоты, основываясь на которой простым способом можно вывести формулу для коэффициента полезного действия цикла Карно.

K. Aramyan

Physical Principles of Heat Engines and Their Coefficient of Efficiency

The article discusses one of traditional themes of university and school physics curriculum that is the physical principles of the work of heat engines and the fundamental physical laws, on which the work of the heat engines is based.

It is especially noted that equilibrium and, accordingly, reversibility of the processes are the cornerstone of the proof of Carnot's theorem.

It is indicated that the known type of cycle unambiguously follows from the requirement of reversibility of all processes, as well as from the requirement to obtain the maximum efficiency.

By analogy with the formula of the work, it is proposed to use the formula of elementary quantity of heat on the base of which, by a simple method, a formula for the efficiency of Carnot's cycle can be derived.

Հոդվածում քննարկվում է ֆիզիկայի դպրոցական և բուհական դասընթացների ավանդական թեման՝ ջերմաշարժիչների աշխատանքի ֆիզիկական սկզբունքները և այն հիմնարար օրենքները, որոնց վրա հիմնված է ջերմաշարժիչների աշխատանքը:

Հատկապես նշվում է, որ պրոցեսների հավասարակշիռ լինելը Կառնոյի ցիկլի և Կառնոյի թերմոմի ապացուցման հիմնաքարն է:

Ընդգծվում է, որ Կառնոյի ցիկլի հայտնի տեսքը միարժեքորեն բխում է պրոցեսների հավասարակշիռ լինելու պայմանից, ինչպես նաև առավելագույն ՕԳԳ ստանալու անհրաժեշտությունից:

Տարրական աշխատանքի բանաձևի նման առաջարկվում է օգտվել նաև տարրական ջերմաքանակի բանաձևից, որի վրա հիմնվելով՝ պարզ եղանակով ստացվում է Կառնոյի ցիկլի ՕԳԳ-ի բանաձևը:

Դպրոցական դասընթացում նշված թեման ավանդաբար դասավանդվում է՝ չնշելով պրոցեսների շրջելիության նշանակաթյունը և պայմանները, հատկապես ջերմությունը մեխանիկական աշխատանքի փոխակերպելու համար այն հիմնարար պայմանը, որի համաձայն համակարգում անհրաժեշտ է ունենալ ջերմաստիճանների տարբերություն, որի դեպքում միայն առաջանում է ջերմության հոսք՝ ջեռուցիչից դեպի սառնարան: Ջերմության հոսքը ուղեկցվում գազի հոսքով, որը արգելակելով կարող ենք ստանալ մեխանիկական աշխատանք: Այլապես սովորողի համար

լիովին անհասկանալի է, օրինակ, սառնարանի առկայության անհրաժեշտությունը մեքենայի մոդելում:

Դպրոցական դասընթացի համապատասխան թեմայում կարդում ենք. «Գազը, որպեսզի կարողանա նորից աշխատանք կատարել, պետք է վերադարձվի սկզբնական վիճակին: Գազի վիճակի փոփոխությունների համախումբը, որի հետևանքով գազը վերադառնում է սկզբնական վիճակին, կոչվում է շրջանային պրոցես կամ ցիկլ» [1]:

Հիմնարարար նշանակություն ունի այն, թե երբ գազը կարելի է վերադարձնել սկզբնական վիճակին: Ինչպես հայտնի է, դա կարելի է անել միայն հավասարակշիռ պրոցեսների ժամանակ, երբ բացակայում են ջերմության և գազի անկառավարելի հոսքերը: Որպես օրինակ կարելի է դիտարկել հետևյալ մոտվի փորձը: Դիցուք անոթը միջնորմով բաժանված է երկու մասի, որոնցից մեկում առկա է գազ, իսկ մյուսը՝ դատարկ է: Եթե բացենք միջնորմում գտնվող ծորակը, ապա տեղի կունենա գազի անկառավարելի, ինքնաբերաբար ընդարձակում, և պրոցեսի ընթացքում հնարավոր չէ նշել գազի զբաղեցրած ծավալի սահմանները, իսկ ճնշումը, խտությունը, ինչպես նաև ջերմաստիճանը կետից կետ փոփոխվում են: Այդ դեպքում մենք չենք կարող կրկնել պրոցեսը հակառակ ուղղությամբ, այն դարձելի չէ:

Իսկ եթե միջնորմը շարժվի բավականին դանդաղ, այնպես, որ ամեն մի փուլում գազը հասցնի հավասարակշռվել, և տվյալ պահին գազը նկարագրող պարամետրերի արժեքները նույնն են գազի ամբողջ ծավալում, ապա այդպիսի հավասարակշիռ վիճակների շղթան կարելի է կրկնել հակառակ ուղղությամբ, և պրոցեսը կլինի դարձելի:

Հիմնարար փաստ է այն, որ ջեռուցչի և սառնարանի տվյալ ջերմաստիճանների դեպքում դարձելի մեքենայի ՕԳԳ-ն է առավելագույնը, և այն կախված չէ մեքենայի բանոդ մարմնի նյութի տեսակից [2]: Այդ պնդումը կազմում է Կառնոյի թեորեմի բովանդակությունը, որի ապացուցման համար Ս.Կառնոյին պետք չեկավ կիրառել էներգիայի պահպանման օրենքը ջերմային պրոցեսների դիտարկման ժամանակ, առավելապես, որ այն ժամանակ թերմոդինամիկայի 1-ին օրենքը դեռ ձևակերպված չէր:

Ըստ Ռ.Ֆեյնմանի [3] այդ թեորեմի՝ Սադի Կառնոյին պատկանող ապացուցումը ֆիզիկայի պատմության մեջ ամենագեղեցիկ դատողություններից մեկն է, և ձևական ու անհասկանալի շարադրանքի փոխարեն կարելի է ներկայացնել այն, առավելապես, որ թեորեմի ապացուցումը հասկանալի պահանջում է միայն մտքի ճկունություն և տրամաբանության առկայություն: Առավելապես, որ դասավանդման հիմնական նպատակը ոչ թե փաստերի հավաքածուի փոխանցումն է, այլ գիտելիքի հանդեպ գործունե հետաքրքրության առաջացումը, որպեսզի «ինչու» հարցը ուղեկից լինի սովորողին ամբողջ կյանքի ընթացքում:

Կառնոյի թեորեմի հիմնական բովանդակությունն այն է, որ հենց ջերմային մեքենայի դարձելի լինելն է ապահովում առավելագույն ՕԳԳ-ն, և ջերմային մեքենաների մասին խոսելիս անպայման պետք է պարզաբանել նշված հարցը, ինչպես նաև ջերմադինամիկայի երկրորդ սկզբունքի պարզագույն ձևակերպումը (Կլաուզիուս), որի համաձայն ջերմությունը ինքնաբերաբար հոսում է տաք մարմնից դեպի սառը մարմինը, և մեքենայի սառնարանի առկայությունը հենց պայմանավորված է ջերմության հոսքի ստեղծման անհրաժեշտությամբ: Ինչպես նաև այն, որ իրականում սառնարանի դերը կատարում է շրջակա միջավայրը, որի ջերմաստիճանը շատ ավելի ցածր է, քան վառելիքի այրման ժամանակ ստացվող ջերմաստիճանները:

Բերենք ևս մեկ պարբերություն դպրոցական դասընթացից՝ «Այս խնդիրը լուծել է Սադի Կարնոն 1824 թ.: Նա ցույց է տվել, որ ամենաշահավետը 2 իզոթերմ և երկու ադիաբատ պրոցեսներից բաղկացած շրջանային պրոցեսն է (Կառնոյի ցիկլ)»:

Սակայն գազի՝ ջեռուցչի և սառնարանի հետ հալման ժամանակ պրոցեսների իզոթերմ լինելը բավականին պարզ կարելի է բացատրել՝ ելնելով ջերմության՝ առանց աշխատանք կատարելու ինքնաբերաբար հոսքերի բացակայության անհրաժեշտությունից, ինչը բխում է առավելագույն ՕԳԳ ստանալու նախապայմանից [1]: Իրոք, եթե կոնտաքտի ժամանակ գազի ջերմաստիճանը լինի ավելի ցածր, քան ջեռուցչի ջերմաստիճանն է, ապա կառաջանա ջերմության ինքնաբերաբար հոսք ջեռուցչից դեպի գազը, որը չի ուղեկցվում աշխատանք կատարելով, ինչը հակասում է առավելագույն ՕԳԳ ստանալու պայմանին:

Շրջելիության վրա հիմնված Կառնոյի թեորեմի ապացուցումը [2] չի ընդգրկում պրոցեսների շրջելիությունից բացի որևէ այլ հիմնարար բնույթի տեղեկություն և ծառայում է որպես տրամաբանական նուրբ դատողությունների փայլուն օրինակ, և այդ ապացուցմանը չի խանգարում անդրադառնալ գոնե խորացված ուսումնասիրության դեպքում:

Դիցուք A մեքենան T_1 ջերմաստիճանում ջեռուցչից ստանում է Q_1 ջերմաքանակ, կատարում է W աշխատանք և վերադարձնում սառնարանին որոշակի ջերմաքանակ T_2 ջերմաստիճանում (տես նկ. 1): Դիցուք մենք ունենք ևս մեկ՝ B մեքենա, նույն ջեռուցչով և սառնառանով: Մենք նույնիսկ չենք հետաքրքրվում, դարձելի է արդյոք այդ մեքենան, թե ոչ: Ենթադրենք, որ B մեքենան կատարում $W' > W$ աշխատանք: B մեքենան ջեռուցչից ստանում է Q_1 ջերմաքանակ T_1 ջերմաստիճանում, կատարում է W' աշխատանք, և ջերմաքանակի մյուս մասը հաղորդում է սառնառանին: Օգտագործելով այն, որ A մեքենանան դարձելի է, կատարենք W աշխատանք՝ աշխատացնելով A մեքենան հակառակ ուղղությամբ: Այդ ընթացքում այն սառնառանից կվերցնի Q_2 ջերմաքանակ T_2 ջերմաստիճանում և ջեռուցչին կվերադարձնի Q_1 ջերմաքանակ T_1 ջերմաստիճանում: Ո՞րն է այդ կրկնակի ցիկլի մաքուր արդյունքը: Մենք ամեն ինչ վերադարձրել ենք սկզբնական վիճակին և կատարել ենք $W' - W$ աշխատանք: Արդյունքում սառնառանից անջատեցինք $Q_1 - Q_2 = W' - W$ էներգիա՝ հաղորդելով այն ավելի բարձր ջերմաստիճան ունեցող ջեռուցչին, և կատարեցինք աշխատանք: Սակայն ըստ Կառնոյի պոստուլատի՝ արգելվում է առանց շրջապատում տեղի ունեցող փոփոխությունների ավելի ցածր ջերմաստիճանում գտնվող մարմնից ջերմաքանակ հաղորդել ավելի բարձր ջերմաստիճան ունեցող մարմնին և կատարել աշխատանք:

Հիմա ենթադրենք, որ B մեքենան նույնպես դարձելի է: Այդ դեպքում ոչ միայն $W' > W$, այլև $W > W'$: Որպեսզի ապացուցենք դա, բավական է նախորդի համեմատ շրջել մեքենայի աշխատանքը: Այսպիսով, եթե երկու մեքենաներն էլ դարձելի են, ապա նրանք պետք է կատարեն հավասար աշխատանք: Մենք եկանք Կառնոյի փայլուն արդյունքին՝ եթե մեքենան դարձելի է, ապա նշանակություն չունի, թե ինձպես է ջերմությունը փոխակերպվում աշխատանքի: Դարձելի մեքենայի աշխատանքը կախված չէ մեքենայի կառուցվածքից, և այն առավելագույնն է ջեռուցչի և սառնարանի տվյալ ջերմաստիճանում:

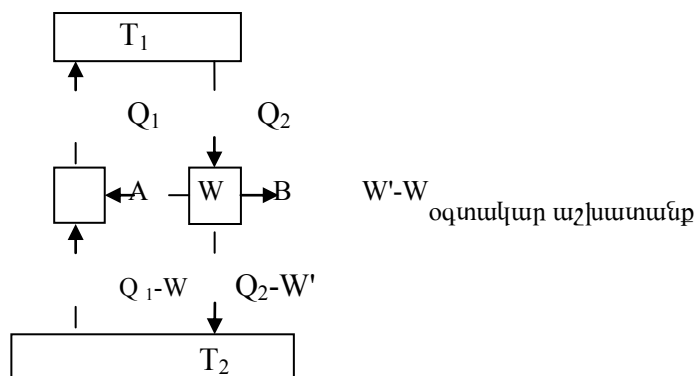
Այսպիսով՝ նշված թեման բացատրելիս պետք է առաջին հերթին հիմնվել բոլոր պրոցեսների դարձելի լինելու անհրաժեշտության և այն փաստի վրա, որ այդ պայմանից բխում է հենց Կառնոյի ցիկլի առավելագույն ՕԳԳ-ն ապահովելու երևույթը:

Մեր կարծիքով, դպրոցականան դասընթացում կարելի է դիտարկել նաև Կառնոյի ցիկլի ՕԳԳ-ի հաշվման նպատակահարմարությունը՝ հիմնվելով հետևյալ դատողությունների վրա [1]: Դպրոցական դասընթացից գիտենք, որ գազի ծավալի անվերջ փոքր փոփոխության ժամանակ կատարած աշխատանքը $\Delta W = P \cdot \Delta V$, որտեղ P -ն՝ -գազի ճնշումն է, ΔV -ն՝ -գազի ծավալի փոփոխությունը: Այդ բանաձևը հետևում է մեխանիկական աշխատանքի սահմանումից, և նշանակում է, որ ծավալի տվյալ փոփոխության դեպքում ավելի մեծ աշխատանք կատարվում է ավելի մեծ ճնշման դեպքում:

Ջերմափոխանակումը ավելի ինտենսիվ է կատարվում ավելի մեծ ջերմաստճանների տարբերության դեպքում: Ինչպես մեխանիկական աշխատանք կատարվելու համար անհրաժեշտ է կոորդինատի փոփոխություն, այնպես էլ, հաշվի առնելով թերմոդինամիկայի I-ին սկզբունքով հաստատվող աշխատանքի և ջերմաքանակի համարժեքությունը, կարելի է ենթադրել, որ ջերմափոխանակման հավասարակշիռ պրոցեսների ժամանակ գոյություն ունի պարամետր, կամ «ջերմադինամիկական կոորդինատ», որի փոփոխության ժամանակ միայն կարող է տեղի ունենալ ջերմափոխանակում: Մեծ ուժի, բարձր ճնշման առկայությունը դեռ չեն նշանակում, որ կատարվում է աշխատանք՝ անհրաժեշտ է տեղափոխություն:

Ջերմաստիճանների տարբերության առկայությունը դեռ չի նշանակում, որ կատարվում է ջերմափոխանակում՝ պետք է, փոփոխվի «ջերմադինամիկական կոորդինատը», ի հարկե, նորից նշելով պրոցեսի հավասարակշիռ լինելը: Հիմնվելով նշված դատողությունների վրա, կարելի է ենթադրել, որ ջերմափոխանակման հավասարակշիռ պրոցեսներում, օրինակ գազի և ջեռուցչի անվերջ փոքր ջերմաստիճանների տարբերության դեպքում, ջեռուցչից գազի ստացած (սառնառանին հաղորդած) ջերմաքանակի համար գոյություն ունի հետևյալ բանաձևը՝ $\Delta Q = \gamma \cdot \Delta T$, որտեղ բացարձակ ջերմաստիճանը հանդես է գալիս որպես «ջերմադինամիկական ուժ», իսկ S -ը՝ որպես «ջերմադինամիկական կոորդինատ» (Կլաուզիուս) [2]: Այդ S -ը անվանում են էնտրոպիա: Կարելի է նաև որոշ տեղեկություններ հաղորդել էնտրոպիայի հիմնարար բնույթի վերաբերյալ: Նշել նաև այն, որ էնտրոպիան ջերմափոխանակման պրոցեսը նկարագրելիս հանդիսանում է «բնական» փոփոխական:

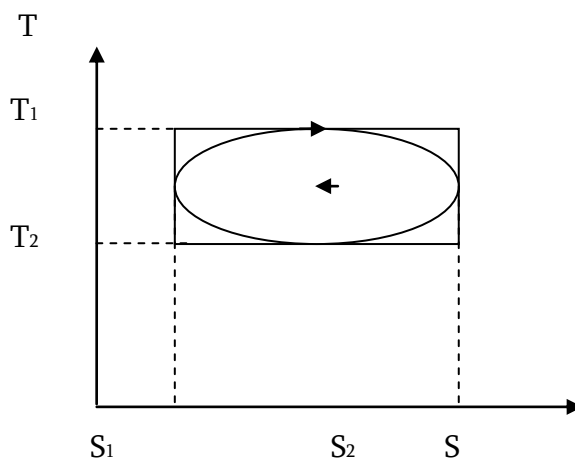
Որպես այդ վկայող կարևոր օրինակ կարելի է բերել Կառնոյի ցիկլի տեսքը (T - S) փոփոխականների գույգի միջոցով (տես նկ. 2)՝ նշելով, որ աղիաբատ պրոցեսում ջերմափոխանակումը բացակայում է, և եթե այն հավասարակշիռ է, ապա «ջերմադինամիկական կոորդինատը» չի փոփոխվում:



Նկ.1

Ինչպես (P-V) հարթության մեջ մեխանիկական աշխատանքը պատկերվում է Կառնոյի ցիկլի գրաֆիկով սահմանափակված կորի մակերեսով, այնպես էլ փոխանցվող ջերմաքանակը (T-S) հարթության մեջ պատկերվում է Կառնոյի ցիկլի ուղղանկյունաձև տեսք ունեցող գրաֆիկով: Սակայն այդպիսի «բնական փոփոխականերով» շատ ավելի պարզ է կատարվում Կառնոյի ցիկլի ՕԳԳ-ի հաշվարկը, ինչպես նաև ապացուցումը այն փաստի, որ ցիկլի ՕԳԳ-ն կախված չէ բանոդ մարմնի տեսակից: Չէ՞ որ (T-S) հարթության մեջ ցիկլը պատկերվում է ուղղանկյունով՝ անկախ բանոդ մարմնի տեսակից:

(T-S) պարամետրերի օգտագործումը հնարավորություն է տալիս անմիջապես տեսնել այն, որ ջեռուցչի և սառնարանի տվյալ ջերմաստիճանների դեպքում Կառնոյի ցիկլի ՕԳԳ-ն առավելագույնն է: Չէ՞ որ ցանկացած ներգծած կորի սահմանափակված մակերեսը ավելի փոքր է, քան ուղղանկյան մակերեսը:



Նկ.2

Անմիջապես կարելի է հաշվել նաև Կառնոյի ցիկլի ՕԳԳ-ն:

Ջեռուցչից ստացած ջերմաքանակը՝

$$Q_1 = T_1(S_2 - S_1),$$

Սառնարանին տված ջերմաքանակը՝

$$|Q_2| = T_2(S_2 - S_1),$$

Ցիկլի օգտակար գործողության գործակիցը՝

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1(S_2 - S_1) - T_2(S_2 - S_1)}{T_1(S_2 - S_1)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Եզրակացություն:

Վերև բերված դիտարկման հիմնական նպատակն է հայտնել այն համոզմունքը, որ ուսման բուն նպատակը ոչ թե տեղեկությունների մեխանիկական հաղորդումն է, այլ պարզ հիմնարար սկզբունքների վրա հիմնված դատողություններն են, որոնք սովորողի մոտ կարող են առաջացնել հետաքրքրություն ուսումնասիրվող նյութի հանդեպ: Միայն այդպիսի մոտեցումը կարող է հաղորդել գործուն գիտելիքներ, որոնք ստիպում են սովորողին գոնե մասնակիորեն վերապրել այն ոգևորությունը, որն ապրում է հետազոտողը բնության գաղտնիքներին առնչվելու և նրանք բացահայտելու ժամանակ: Հետաքրքրություն և զարմանք՝ դրանք ենք հիմնական արդյունքը և ուղեցույցը գիտելիքին առնչվելիս:

Գրականություն

1. Է. Ղազարյան, Ա. Կիրակոսյան, Գ. Մելիքյան և այլք, «Ֆիզիկա-11», ավագ դպրոցի դասագիրք, Երևան, «Էդիտ Պրինտ», 2010 թ. 368 էջ:
2. Р.Фейнман, Р.Лейтон, М.Сендс, Фейнмановские лекции по физике, т. 4, “Кинетика, теплота, звук”, Москва, “Мир”, 1965.
3. Ի. Կ. Կիկոնի, Ա. Կ. Կիկոնի, Մոլեկուլյար ֆիզիկա, Երևան, «Լույս», 1968:
4. Ю.Б.Румер, М.Ш.Рывкин, Термодинамика, статистическая физика и кинетика, Москва, “Наука”, 1977.

Տեղեկություններ հեղինակի մասին

Կարեն Արամյան - ֆիզ.մաթ. գիտ. թեկնածու, պրոֆեսոր, ԱրՊՀ ֆիզիկամաթեմատիկական ֆակուլտետի դեկան
E-mail: k_aramyan@rambler.ru

Հոդվածը տպագրության է ներառվում խմբագրական կոլեկիայի անդամ, ֆ.մ.գ. դ. Ա.Գ.Ալեքսանյանը